

水質管理用水利施設の運用効率化とその経済性分析

中央大学大学院	学生会員	○青木	啓祐
中央大学大学院	学生会員	小石	一字
リバーフロント研究所	正会員	中村	徹立
中央大学	フェロー会員	山田	正

1. はじめに

日本全国で洪水被害の増大，都市用水の不足，河川や湖沼の水質汚濁の進行等が問題化されている．これらを背景に，導水事業は，内水排除，都市用水の供給，河川や湖沼の水質浄化を目的として行われている．また，導水路の水利施設としての働きの一つは必要量の原水を管路内に流すことである．

しかしながら，管路内に導水する際に，新たな問題点が挙げられる．写真-1は，A湖沼の導水管内に付着した中国原産の外来種のカワヒバリガイが，管路壁面に密に付着していることを示している．このカワヒバリガイが管路壁面に付着していることで，管路内で流水の抵抗となっており，一定流量を維持するために必要な消費電力が増加し，年間で約4000万円の電気代が余分にかかってしまう¹⁾．また，写真-1に示すように，A湖沼の導水施設では，カワヒバリガイをすべて人力で除去しており，その除去費用は約2400万円である¹⁾．

図-1は，19m³/s導水時の運用開始年の2000年～2013年までの消費電力を示している．黒色の破線は，2005年～2013年までの平均消費電力を示している．この図から，破線の平均消費電力は，運用開始年の消費電力と比べて約1割増加していることがわかる．これは，導水管内に付着したカワヒバリガイの影響が大きく，水利施設として運用の効率化を図る必要があると考えられる．ここで水利施設の効率化を図ることができれば，余分にかかっていた費用を，例えば治水事業や魚道の整備等に充てることができる．

本研究では，導水施設を効率的に運用することを目的とし，管路の壁面粗度と消費電力との関係を明らかにした．具体的には，管路の壁面粗度を相当粗度とし，管路の壁面粗度の大きさが消費電力に与える影響を定量的に求めた．

2. 研究手法

本研究では，管路の壁面粗度と消費電力（カワヒバリガイの影響による消費電力）との関係を明らかにするために，導水管 2 本で 19m³/s の流量が導水されることから，1 本で 9.5 m³/s の流量が導水されると考え，消費電力の計算を行った．

計算は，9.5 m³/s の流量から流速を算出し，一定流量を流すために必要な圧力勾配の式を用いて消費電力を算出した．用いた式は Bernoulli の定理と抵抗則として Darcy-Weisbach の式を 1 階微分し，圧力勾配について解いた(1)式を用いて消費電力を算出する．

ここに， δh ：導水路の標高差 [m]， L ：導水機場間の距離距離 [m] である．以下に示す(2)式は，(1)式で

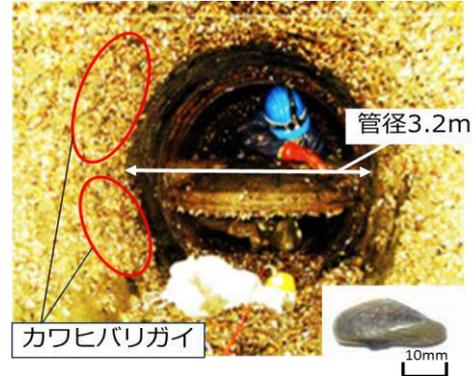


写真-1 導水管内のカワヒバリガイの付着状況とカワヒバリガイ¹⁾

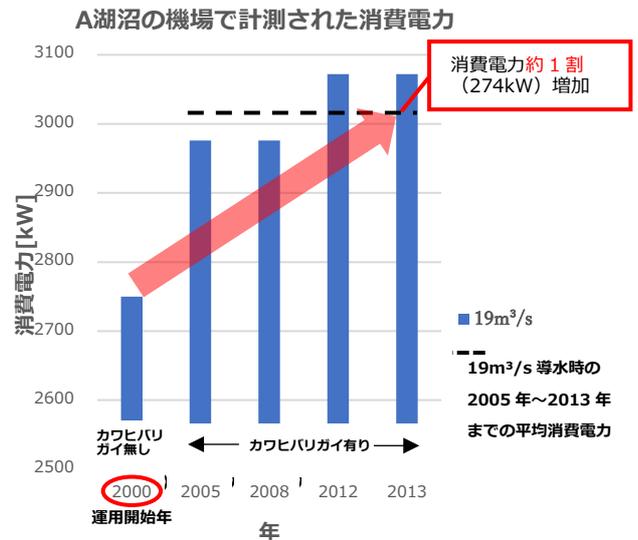


図-1 運用開始年の2000年の消費電力と2005年～2013年までの平均消費電力¹⁾

$$-\frac{dp}{dx} = \rho g \left(\frac{fv^2}{8Rg} + \frac{dz}{dx} \right) = \frac{\rho fv^2}{8R} - \rho g \frac{\delta h}{L} \quad (1)$$

得られた圧力勾配を管路長で積分して圧力を算出し，断面積と流速を乗じて仕事率を算出した式である．

$$P_w = -Av \int_0^L \frac{dp}{dx} dx \quad (2)$$

ここに， P_w ：仕事率である．本研究では，この算出した一定流量を維持するために必要な仕事率を，消費電力として扱い，実測消費電力と比較した．また，摩擦損失係数の算出には，(3)式を用いて，管路壁面の摩擦損失係数をそれぞれ算出した³⁾．

キーワード 水利施設，効率化，圧力勾配，Bernoulli の定理，相当粗度

連絡先 〒112-8551 東京都文京区春日 1-13-27 中央大学理工学部 Tel 03-3817-1805 Fax 03-3817-1803

$$(粗面) \quad \frac{1}{\sqrt{f}} = 1.14 - 2.0 \log_{10} \frac{k_s}{d} \quad (3)$$

ここに、 k_s ：相当粗度 [m]， d ：管径 [m] である。管路の壁面粗度の計算では相当粗度を変えて、消費電力を算出した。

次にポンプの機械損失を考慮して計算を行う。ポンプ効率とは、ポンプのモータから得た電力がどれだけ管路内の水に仕事をしたかを表す。以下の(4)式にポンプ効率を示す⁴⁾。

$$\eta = \frac{P_w}{P_s} \quad (4)$$

ここに、 η ：ポンプ効率 [%]， P_s ：軸動力 [kW]， P_w ：水動力 [kW] である。軸動力は、モータの駆動力であり、本研究では、実測消費電力を用いた。水動力は、水がポンプから得る動力であり、(5)式で与えられる⁴⁾。

$$P_w = \rho g Q H \quad (5)$$

ここに、 Q ：管路内に流れる流量 [m³/s]， H ：全水頭 [m] である。ポンプ効率を求めるために、9.5m³/sの流量で 2~8mの全水頭⁴⁾を与えて水動力の計算を行い、ポンプ効率を算出した⁴⁾。

$$P_{wa} = P_s - P_p - P_{sh} \quad (6)$$

ここに、 P_{wa} ：管路内にかかる水動力 [kW]， P_s ：実測消費電力 [kW]， P_p ：機械損失（衝突損失、摩擦損失、減速損失等）による電力 [kW]， P_{sh} ：管路の形状損失（曲がり、屈曲等）による電力 [kW] である。

4. 計算結果と考察

図-2は、9.5 m³/sの流量を管路内に流すために必要な消費電力と相当粗度の関係を示したものである。図中の曲線は、圧力勾配から算出した消費電力（仕事率）の計算値であり、黒色で示す破線は、カワヒバリガイが付着していない場合の消費電力である。水色の線は、実測消費電力から、管路の形状損失による消費電力を引いた線である。ポンプの機械損失による消費電力は灰色の矢印で示している区間である。つまり、カワヒバリガイのみによる消費電力は、ポンプ効率が 50~70%の時、相当粗度は 2~4cm 程度であった。一般に、ポンプの種類によって異なるが、ポンプ効率は 9.5m³/sの時、50~70%である⁴⁾ことから、本研究で示した計算値は、実測値と合致していると推測される。

表-1は、ポンプ効率が 50~70%の時のカワヒバリガイの影響による消費電力及び 1 年間の消費電力量とその電気代を示している。ここでは、カワヒバリガイを 1年に 1 回除去すると仮定する。表-1 よりカワヒバリガイを除去した方が運用の効率化を図れることがわかる。ポンプ効率が 50%の時、電気代が約 7500 万円かかるのに対して、人力除去費は 1200 万円である^りことから、電気代を約 5000 万円抑えることができ、この費用を治水事業や魚道の整備に充てられる。

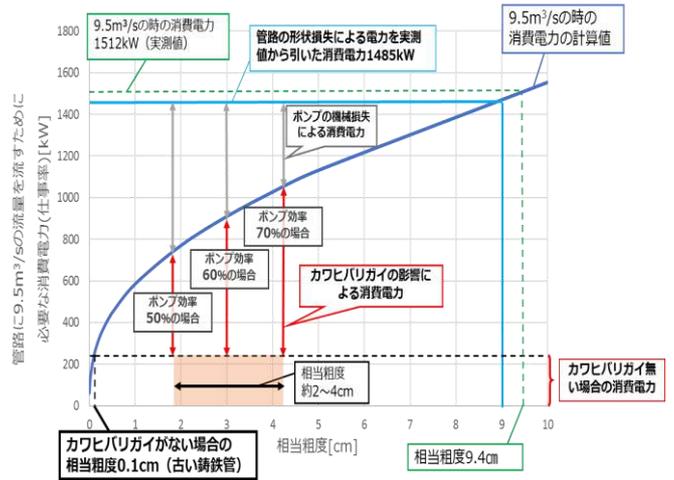


図-2 管路内に 9.5m³/s の流量を流すために必要な消費電力と相当粗度の関係

表-1 消費電力量を 1 年当たりの電気代に換算

ポンプ効率[%]	カワヒバリガイの影響による消費電力[kW]	カワヒバリガイの影響による消費電力を 1年間使用した場合の消費電力量[kWh]	電気代[万円/年]
① 50	516	4464×10 ³	7488
② 60	667	8004×10 ³	13428
③ 70	818	9816×10 ³	16476

1回あたりの人力除去費
1200万円

5. まとめ

本研究で得られた知見を以下に示す。

- 1) 運用開始年である 2000 年の消費電力は、2005 年~2013 年までの平均消費電力に比べて約 1 割大きい。
- 2) カワヒバリガイの有無による消費電力差は、516kW~818kW であり、カワヒバリガイが付着していない場合と比べて約 2~4 倍大きい。
- 3) 管路の形状損失や機械損失による電力を実測消費電力から引いた時、ポンプ効率が約 50~60%で相当粗度が 2~4cm 程度であった。
- 4) 一般的なポンプ特性と本研究で示した計算値は、実測値と合致している。
- 5) カワヒバリガイを除去した方が運用の効率化を図れることがわかった。

6. 今後の展望

CommonMPを用いて管路内の再現計算ができるように進めていく。

7. 参考文献

- 1) 中村徹立, 山田正：導水管内に付着するカワヒバリガイの対策に関する研究, 水利科学, No.360, 2018.
- 2) 中村徹立, 山田正：手賀沼浄化のための日内水位変動及び水位低下に関する研究, 水利科学, No.358 (第 61 巻 第 5 号), 2017.
- 3) 日野幹雄：明解水理学, pp.87-91, pp.173-190, 丸善出版, 1983.
- 4) 須藤浩三, 山崎慎三, 大坂英雄, 林農：流体機械, pp.1-8, 朝倉書店, 2008.